

ベストエフォート型移動通信網における ストリーミングトラフィックの制御手法の検討

森川 大補 太田 慎司 大橋 正良

(株) KDDI 研究所
〒356-8502 埼玉県上福岡市大原 2-1-15

E-mail: {morikawa, ota, ohashi}@kddilabs.jp

あらまし 本稿では、ベストエフォート型移動通信パケット網でのビデオストリーミングを想定したトラフィック制御システムを提案する。提案方式では、まず、輻輳の起こる可能性の高いノードのバッファ量の推移を周期的にモニタリングする。バッファ量の推移が一定の条件を満たした場合、その時点のキュー情報をゲートウェイに通知する。通知を受けたゲートウェイでは、通知情報や現時点での送出レートをもとに動画像ストリーミングの送出レートを調整する。また、ベストエフォート型の移動通信パケット網上において、提案方式によるストリーミングトラフィックの制御を行った場合の有効性を、シミュレーションにより検証する。シミュレーション結果から、各ユーザが受信するデータ量をアプリケーションレベルで調整し、無線リンクの変動により生じるパケットロスを抑制することが可能であることを示す。

キーワード 移動パケット網、ビデオストリーミング、トラフィック制御、フィードバック制御

A Study of Streaming Traffic Control Method in Best Effort Mobile Packet Network

Daisuke MORIKAWA, Shinji OTA, and Masayoshi OHASHI

KDDI R&D Laboratories Inc.
Ohara 2-1-15, Kamifukuoka-shi, Saitama, 356-8502 Japan

E-mail: {morikawa, ota, ohashi}@kddilabs.jp

Abstract In this paper, we propose a packet traffic control mechanism for video streaming service in best-effort high-speed mobile packet network. Proposed mechanism is summarized as follow. First a change in a packet buffer on a network node, where network congestion frequently occurs, is monitored periodically. When a change in a packet buffer meets the given condition, a measured value of a packet buffer is notified to a gateway. The rate of video streaming sent from a gateway to a client is controlled based on the notified value of a packet buffer and a current rate measured at a gateway. The proposed mechanism is evaluated in a network simulator. A network simulator is composed of best-effort mobile packet network and the proposed rate control mechanism of a streaming traffic. It is clarified that the traffic volume of a video stream is adaptively controlled on the application layer to avoid congestions by dynamic change in a wireless bandwidth.

Key words Mobile Packet Network, Video Streaming, Traffic Control, Feedback Control

1. まえがき

移動通信パケット網において、動画像再生機能を搭載した携帯電話端末への動画像配信サービスが開始された。現在、数十秒程度の動画像データを一旦蓄積してから再生するダウンロード方式と、ファイルを受信し始めたら再生を開始するストリーミング方式が採用されている[1]。今後、利用者の増加、コンテンツの増加とともに、より長時間の動画像データを配信する需要が高まると想定される。また、今後は、3GPP2における cdma2000 1x EV-DO 方式[2]のような、ベストエフォート型の移動通信パケット網においても動画像配信は有力なサービスの 1 つになると想定される。

一般に、ダウンロード型の動画像配信では、配信データサイズに見合う蓄積データ領域が携帯電話端末に必要である。それに対して、ストリーミング型の動画像配信では、再生済みのデータは破棄するため、再生開始までにバッファリングするデータサイズに見合う蓄積データ領域があればよく、携帯電話端末に大きなデータ格納領域を必要としない。このため、長時間の動画像配信サービスを行う場合は、ストリーミング再生が有効な手段であると考えられる。

ストリーミング配信においては、到達保証よりも実時間性が要求される。そこで、本稿では、ストリーミング配信におけるトランスポートプロトコルとして UDP (User Datagram Protocol) [3]を利用する場合を想定する。UDP では、フロー制御機構がないため、ネットワークの帯域変動や遅延変動と関係なく、送出可能なデータすべてを送出してしまう。その結果、回線の利用可能帯域を上回るデータ量を送信した場合、パケット到着時間の変動(ジッタ)が大きくなったり、バッファ溢れが生じてしまう。これらの問題を解決するためには、送出トラフィックのレート制御を適切に行う必要がある。

さらに、cdma2000 1x EV-DO 方式では、無線リソースの有効利用を図ることを目的に、適応変調方式を採用している。このため、電波の受信状況等により、無線リンクのベアラ速度や、無線リンクパケットスケジューリングによる遅延変動が、ミリ秒オーダーで変動する。したがって、有線網に比べてネットワークの帯域変動や遅延変動が大きいことを考慮する必要がある。

以下では、まず、動画像ストリーミングのトラフィック制御の従来研究とその問題点について述べる。

続いて、上述のようなベストエフォート型の移動通信パケット網上で、動画像ストリーミング配信を行う際の、ネットワークの帯域変動や遅延変動を考慮したストリーミングトラフィック制御方式を提案する。提案制御方式は、輻輳が生じる可能性の高い基地局ルータのバッファ変動量を監視し、そのフィードバック結果に基づいて動画像ストリームの出力レートを制御することを特徴としている。その後、シミュレーションにより提案制御方式の有効性を評価した結果を示し、考察を行う。最後に、まとめを述べる。

2. 従来研究と解決すべき課題

送出レート調整によるトラフィック制御方式は、サーバもしくはサーバークライアント間に位置するゲートウェイにおいて、レート変更を行う方式が主流である。Chung らは、UDP ストリーミングに対し、以下に示すレートベースのトラフィック制御方式を提案している[4]。

- ・ まず、動画像データの送信方法として、送信レートの低いものから高いものまで、いくつかの送信パターンを設定しておく。
- ・ データ送信は、最低レートの送信パターンから開始し、受信側で輻輳を検出しなければ、現状より送信レートの高い送信パターンに変更する。逆に、受信側で輻輳を検出したら、現状より送信レートの低い送信パターンに変更する。
- ・ 輻輳の検出は、受信側でのフレームロスにより行う。フレームロスの検出条件は、シーケンス番号の抜けを検出した場合、もしくは、一定時間を過ぎても次のシーケンス番号のデータが到達しない場合のいずれかである。

本手法では、受信側からの情報通知に基づくフィードバック型のレート制御を行っているが、本手法を用いて、移動通信パケット網上で UDP ベースの動画像ストリーミング制御を行う場合、いくつかの問題点が生じる。

まず、無線リンクにおいて誤りが発生した場合、受信側では正しいデータとして復号できない。そのため、ネットワークが輻輳していない場合でも、無線リンクで誤りが生じたら、シーケンス番号の抜けがあるということで輻輳と判断してしまう。したがって、受信側でのフレームロスの検出をトリガとする方法では、必ずしも適切なレート制御が適切に行

われるとは限らない。

次に、バックボーン回線の帯域がアクセス回線に比べて十分にあるとすると、ネットワーク輻輳は、無線リンクにおける帯域の変化により生じる。すなわち、ボトルネックリンクの直前にあるノード (e.g., 基地局ルータ) のバッファが溢れることにより、パケットが破棄されるケースが多い。したがって、ネットワーク上でパケットロスが発生してから、それを受信側で検出するまでに時間がかかるため、レートの変更制御までに時間がかかってしまう。さらに、パケットロスの検出がレート制御のトリガであるため、理想的に制御が動作したとしても、確実にパケットロスを回避することができない。

一方、レートの変更方法として、主に、2つの方法が提案されている。1つは、トランスコードを用いる方法である。トランスコードは、ビデオストリームを復号/再符号化するものであり、トランスコードを用いたレート制御方式が提案されている[5]。もう1つは、ビデオデータをあらかじめ複数のサブストリームに分割しておき、ネットワーク状況に応じて、統合するサブストリームの数を適切に変更する方法である。この方法は、IP マルチキャストを利用した UDP ベースのビデオ伝送においても提案されている方法である[6]。いずれの場合においても、レート制御を行う場合、可能な限り、レートの変更回数は少ない方がよい。

そこで、次章では、これらの問題を解決する制御方式を提案する。

3. 提案制御方式

本稿で提案する制御方式の概要を図1に示す。輻輳の起こる可能性の高い基地局ルータのバッファ量の推移を定期的にモニタリングしておき、バッファ量の推移が一定の条件を満たした場合、その時点のキュー情報をゲートウェイに通知して適切なレート制御を行う。従来の制御方式では、ネットワークノードへの変更を必要としないが、受信クライアントの負荷は増える。これに対し、提案方式では、基地局ノードに機能を追加する必要があるが、受信クライアントは、追加機能は特に必要としない。なお、本稿での制御方式では、無線リンクにおいて生じる誤りの軽減に関しては考慮せず、無線環境に応じた適切な変調方式の採用や強力な誤り訂正方式の採用等、無線システムによるものとする。以下、提案方式の詳細を述べる。

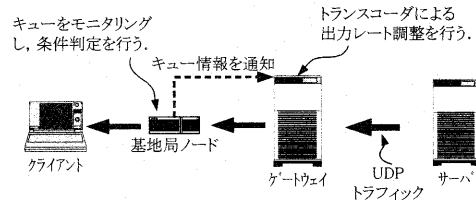


図1 提案システムの構成

基地局ノードでは、一定周期 T_l 毎に、その時点のキュー長をモニタリングし、表1に示すトランスコードのレート DOWN 条件およびレート UP 条件を満たすかどうかチェックする。ただし、N 回目にモニタリングしたキュー長を q_N 、キューの DOWN 条件閾値および UP 条件閾値を、それぞれ q_{upper} 、 q_{lower} とし、 q_{upper} を上回る状態、 q_{upper} と q_{lower} の中間の状態、 q_{lower} を下回る状態を、それぞれ状態Ⅰ、Ⅱ、Ⅲとする。また、表1の条件を満たした場合、ゲートウェイ側にキュー情報として、今回のキュー長 q_N および前回のキュー長 q_{N-1} を送信する。

レート DOWN 条件およびレート UP 条件の判断タイミングの例を図2に示す。図中の(a), (b), (c), および(d)の矢印が、表1に示すそれぞれの条件に対応する。

表1 レート変更条件

レート DOWN 条件
(a) 「 q_{N-1} が状態Ⅰでない、かつ、 q_N が状態Ⅰ」 もしくは、 (b) 「 $q_{N-m+1}, \dots, q_N$ が状態Ⅰ」
レート UP 条件
(c) 「 q_{N-1} が状態Ⅲでない、かつ、 q_N が状態Ⅲ」 もしくは、 (d) 「 $q_{N-m+1}, \dots, q_N$ が状態Ⅲ」

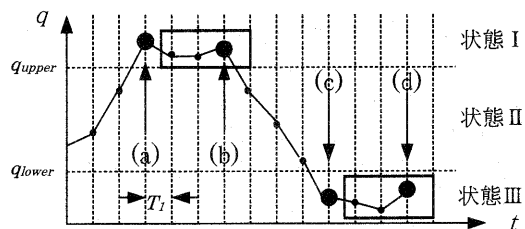


図2 レート変更のタイミング例

一方、ゲートウェイ内のトランスコードは、ターゲットとするコーディグレート $Target\text{-}Rate$ を入力パラメータとし、それにあわせてトランスコード出力を制御するものとする。基地局ノードから通知されたキュー情報 (q_N および q_{N-1}) とその時点の送出

レート $Rate$ から, $Target-Rate$ を算出する. レート DOWN 時およびレート UP 時に設定する $Target-Rate$ の算出式を, それぞれ式(1)および式(2)に示す. なお, m は定数とする.

$$Target-Rate \leftarrow Rate - \Delta R_1 \quad (1)$$

$$\text{ただし, } \Delta R_1 = \frac{\{m \times |q_N - q_{N-1}| + |q_N - q_T|\} \times 8}{m \times T_1}$$

$$Target-Rate \leftarrow Rate + \Delta R_2 \quad (2)$$

$$\text{ただし, } \Delta R_2 = \frac{\{m \times |q_{N-1} - q_N| + |q_T - q_N|\} \times 8}{m \times T_1}$$

これは, 図 3 に示すとおり, レート変更時には, トラフィック制御の結果, $m \times T_1$ 後に, キュー長がターゲットキュー長 q_T になることを想定して算出している.

さらに, トランスコーダのパラメータ変更回数は少ない方がよいため, 算出した $Target-Rate$ 値と現状の $Target-Rate$ 値の差分が一定値 R 未満である場合は, $Target-Rate$ 値は変更しない.

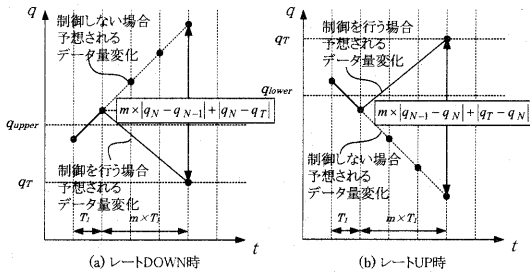


図 3 Target-Rate 算出方法

4. 提案方式のシミュレーション評価

4.1 シミュレーションソフトの構成

提案方式の性能を評価するために, ns2[7]をベースとしたシミュレーション環境を構築した. シミュレーションネットワークは, 図 4 に示すとおり, 入力動画像データを変換した後に送出するトランスコーダを有する Gateway ノード (以下, GW), 無線回線の下りリンクの制御およびバッファモニタリングを行う Access Point (以下, AP), 受信クライアントを有する Access Terminal (以下, AT), および, 中継ノード (以下, node) から構成される. AP では, AT 毎にバッファサイズ q_{limit} のバッファが用意されている. なお, サーバから GW までのデータ転送は, 本シミュレーションの範囲外とする. また, 簡単のため, 1つの AT に対して, 1つの GW ノー

ドを設定する. 以下では, シミュレーションにおける各機能モデルを説明する.

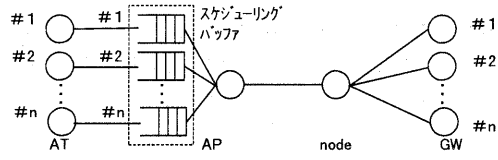


図 4 シミュレーションネットワーク構成

① 伝送プロトコル/下りリンクスケジューリング

GW-AT間のプロトコルスタックを図5に示す.

AP-AT間は, cdma2000 1x EV-DO 相当のプロトコルスタックを模擬している. 具体的には, 図 6 に示すとおり, AP に流入した IP パケットに対し, PPP フレーム, RLP フレーム, および MAC フレームへの分割/組立を行う. RLP フレームおよび MAC フレームは, 固定長であり, それぞれ, 998[bit]および 1024[bit]である.

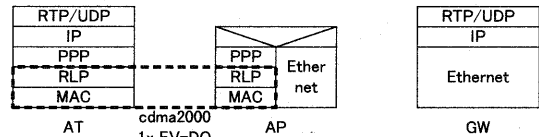


図 5 プロトコルスタック

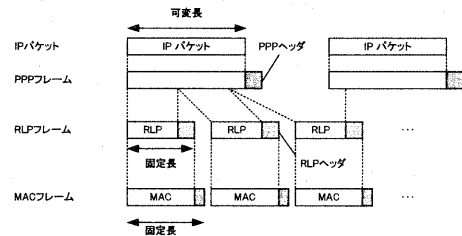


図 6 フレーム間の相互関係

AP-AT間の下り MAC 層では, 1つの下りリンクを, [8]に示されるスケジューリング手法により, 時分割で各 AT へ割当てるとともに, その時の伝送レートを適宜決定する. ここで, 時分割の単位 (1 スロット) は, 1.67[msec]である.

本シミュレーションでは, まず, AT 毎にスケジューリング入力データを用意する. これは, 1.67[msec]毎に, その時点で (AT での電波受信状況から決定される) 伝送可能なレートを記したデータ系列である. 図 7 にスケジューリング入力データの例を示す. 横軸および縦軸は, それぞれスロット番号およびそれぞれの時点での伝送可

能レートである。なお、参考のため、平滑化した値もプロットしている。

次に、[8]に示されるスケジューリング手法により、割当先 AT および伝送レートを決定する。決定された伝送レートに応じて、表 2 に示す対応関係により、利用スロット数と送信する MAC フレーム数を決定する。例えば、ある時点で割当先 AT が AT 1、伝送レートが 76.8[kbps]と決定された場合、8つのスロットを使って、1つの MAC フレームを送信する。(1.67×16[msec]で 1×1024[bit]を送信する。) 次のスケジューリングは、9 スロット目の入力スケジューリングデータを用いて行う。

以上のように、送信先 AT とその時点の伝送レートの決定を繰り返すことにより、下りリンクの帯域および伝送遅延が変化することになる。

なお、本シミュレーションでは、AT-AP 間における誤りの発生は考慮せず、AP-AT 間以外のリンクの帯域は、十分にあるものとする。また、GW-AT 間では、RTP/UDP/IP を用いて動画像データを送信する。ユーザデータ長をここでは 1000[byte]と設定する。

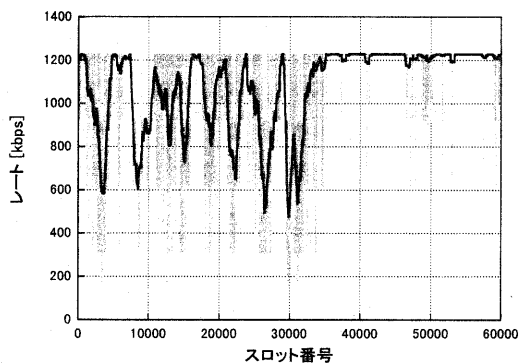


図 7 スケジューリング入力データの例

表 2 伝送レートと利用スロット数・送信 MAC フレーム数の対応関係

伝送レート	利用スロット数	フレーム数
38.4kbps	16	1
76.8kbps	8	1
153.6kbps	4	1
307.2kbps	2	1
614.4kbps	1	1
921.6kbps	2	3
1228.8kbps	1	2
1843.2kbps	1	3
2457.6kbps	1	4

② 入力動画像データ

入力データは、MPEG 4 トレースファイル[9]を利用する。I、P、B のフレーム種別、送出間隔、および各フレームの送信データサイズを指定する。図 8 に入力トレースデータの例を示す。I、P、B のフレーム種別毎および全フレームの 1 秒平均のコンテンツレートをプロットしている。本例では、「IBBPBBPBBPBB」の系列を繰り返し、送出間隔は 40[msec] (1 秒間に 25 フレーム) である。なお、コンテンツレートは、動きが多い場合は高く、動きが少ない場合は低くなっている。

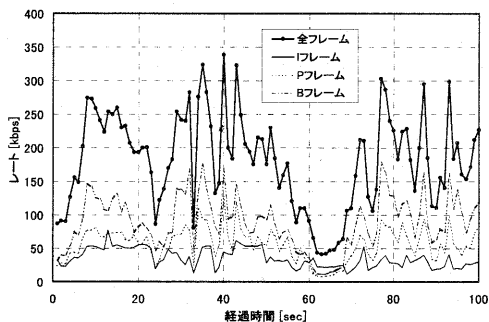


図 8 入力動画像データ系列

③ 動画像トランスコーダ

動画像トランスコーダは、規定のタイミングで読み込んだ入力データに対して、出力レートがターゲットとするコーディングレート *Target-Rate* になるようにフレーム数を間引き (調整) して出力データを生成する。

動画像データを復号する際、I フレームは単独で復号可能であるが、P フレームは I フレームを必要とし、B フレームは I、P フレームを必要とすることから、フレームの間引きは、B および、P フレームを対象とし、I フレームは必ず送信する。したがって、瞬時的に出力レートが *Target-Rate* を超える場合があるが、全体としては *Target-Rate* を超えないように送出フレームの調整を行う。また、入力データに対し、フレーム種別の判断、フレーム数の調整に必要な処理時間は考慮しないものとする。

④ フィードバック制御機構

前節で述べたとおり、AP 内に作成された各 AT 用のキューを一定周期 T_f で監視し、レート変更

条件を満たした場合、キュー情報を GW へ通知する。通知インタフェースは、TCP を用いる。GW では、通知情報を元に、動画像トランスコーダに設定する *Target-Rate* をリアルタイムに変更する。ただし、AP から GW への通知にかかる時間は考慮されているが、GW 内で動画像トランスコーダに設定する *Target-Rate* の算出等に必要な処理時間は考慮しないものとする。

⑤ 受信クライアント

受信クライアントは、受信要求開始から T_2 秒間、データをバッファリングした後、描画処理を開始する。描画処理は、規定のタイミングで各フレームを順次描画するとともに、描画済データを破棄する。フレーム欠損を検出した場合は、規定のタイミング分だけサスペンドした後、次のフレームの描画を行う。ここで、規定のタイミングとは、入力動画像データの送出間隔と同じ値である。

また、データ蓄積量が、受信バッファサイズ *Buffer* を越えた場合は、溢れたデータはその時点で破棄する。

4.2 シミュレーション評価結果および考察

提案方式の制御のもとで、5 ユーザが同時に動画像データを受信開始し、100 秒間の動画像ストリーミングを受信するシミュレーションを行った。スケジューリング入力データおよび、入力動画像データは、すべてのユーザにおいて同一とし、それぞれ、図 7 および図 8 に示した系列とした。本シミュレーションで用いたパラメータを表 3 に示す。

表 3 設定パラメータ一覧

パラメータ	説明	設定値
q_{limit}	キューサイズ	18 [kbyte]
q_{upper}	DOWN 条件閾値	15 [kbyte]
q_{lower}	UP 条件閾値	5 [kbyte]
q_T	ターゲットキュー長	10 [kbyte]
T_1	モニタリング周期	500 [msec]
m	サスペンド回数	3
R	レート変更判定閾値	20 [kbps]
T_2	先読み時間	2000 [msec]
<i>Buffer</i>	クライアントバッファ	70 [kbyte]

以下、ユーザ 1 のシミュレーション結果を示す。図 9-1 は、物理レイヤのレート、AT での受信レート、および、比較値として入力動画像データのレー

トを示す。ただし、レートの算出は 1 秒毎に行った。図 9-2 は、AP でのキューの変動およびそれに応じて決定された *Target-Rate* の変動を示す。図 9-3 は、AT で描画を行う際に検出されたフレームロスレートを示す。ただし、フレームロスレートとは、1 秒間にロスしたフレームのデータ量である。

まず、図 9-2 からわかるように、キューが DOWN 条件閾値 q_{upper} を上回ると、*Target-Rate* が減少し、キューが UP 条件閾値 q_{lower} を下回ると、*Target-Rate* が増加している。また、AT 受信レートの変動から、*Target-Rate* の変動にあわせて送出レートが制御されていることがわかる。また、図 9-3 に示すフレームロスの発生は、キューサイズを超えて、パケットが破棄されたことを示している。

続いて、図 9-4 および図 9-5 は、それぞれ、AT 受信バッファの時系列変動および描画待ち時間 T_{wait} の時系列変動を示す。ここで描画待ち時間 T_{wait} とは、各フレームに対して式(3)で定義される。

$$T_{wait} = (\text{描画開始時刻}) - (\text{AT 到達完了時刻}) \quad (3)$$

図 9-1 と図 9-4 からわかるように、AT 受信バッファの変動は、AT 受信レートの変動と相関がある。また、AT 受信バッファ量は、ほぼ最初の先読み時間（ここでは 2000[msec]）分に相当する受信データが蓄積されている。したがって、AT 受信バッファサイズは、先読み時間 T_2 と、GW からの最大送出レート $Rate_{max}$ から計算される値 $Rate_{max} \times T_2$ に設定しておけば、受信バッファでパケットが破棄されることはない。

描画待ち時間 T_{wait} は、ほとんどの時間において、約 1.9[sec]あたりであるが、時折、大きく変動して短くなる。これは、図 9-2 と図 9-5 の比較からわかるように、AP バッファ量が大きくなると、AP での滞在時間が長くなり、AT への到達時間が遅れることによる。したがって、先読み時間 T_2 の設定は、許容 AP バッファサイズと考え合わせて検討する必要がある。本例では、AP バッファサイズ 18[kbyte]に対して、約 1.6[sec]以上の先読み時間を設定しておかないと、パケット到着遅れによるフレームロスが起こる。

また、描画待ち時間が短くなった後、再び 1.9[sec]あたりに戻っている。これは、*Target-Rate* を下げて、GW からの送出レートを抑えた場合、AP でのバッファ蓄積量が減少し、バッファ滞在時間が小さくなるからである。また、描画待ち時間の

微小な変動は、主に、APでのスケジューリングにおける待ち時間変動によるものと考えられる。本例においては、300[msec]程度の変動である。

引き続き、同様の入力データを用いて、制御を行わない場合のシミュレーションを行った。図10は、制御ありの時と制御なしの時の1秒間あたりのフレームロス変化を示す。図10より、APでレート変更のトリガを検出する提案方式では、フレームロスは大きく抑えられる。しかし、バッファ溢れによるフレームロスをすべて抑えるためには、各ATに割当ててるキューサイズ q_{limit} とキューのDOWN条件閾値 q_{upper} の差分を適切に設定する必要がある。図9-3の例では、最大70[kbps]程度のパケットロス量があり、レート変更のタイムラグを1[sec]程度とすると、キューの最大値をさらに約9[kbyte]引き上げる必要がある。

また、図11は、制御なしの時のIフレームのロス数を示す。制御なしの場合は、ランダムにフレームが破棄されるため、図11に示すように、Iフレームも多く破棄される。Iフレームは、P、Bフレームの復号に必要なため、描画できないフレーム数はさらに増えることとなる。結果として、受信側での描画ができない、もしくは、画面更新がされない等の不都合が生じてしまう。

5. むすび

本稿では、ベストエフォート型の移動通信パケット網におけるストリーミングトラフィックの制御手法を提案した。提案方式では、輻輳の起こる可能性が高い基地局ルータのバッファ量の推移を定期的にモニタリングすることにより、レート変更のトリガをかける。また、モニタリングしたキュー情報およびその時点での送出レートをもとに、変更後のレートを設定する。

また、提案方式を検証するために、ネットワークシミュレータを構築し、検証を行った。シミュレーション結果およびその考察から、提案方式がベストエフォート型移動通信網において有効に動作し、ほとんどのパケットロスを防ぐことを示した。また、提案方式における各種パラメータ、受信クライアントの受信バッファ値および先読み時間値の設定値に関する考察を示した。

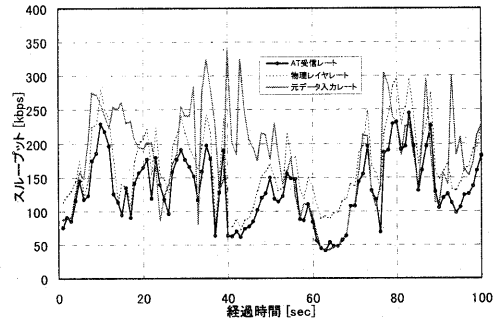


図9-1 元データ入力レート、物理レイヤレートおよびAT受信レートの時系列変動

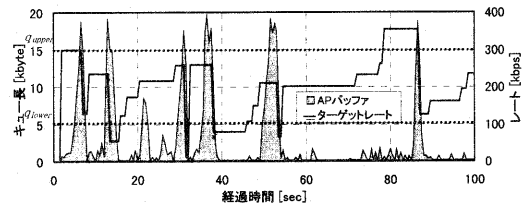


図9-2 APバッファとターゲットレートの時系列変動

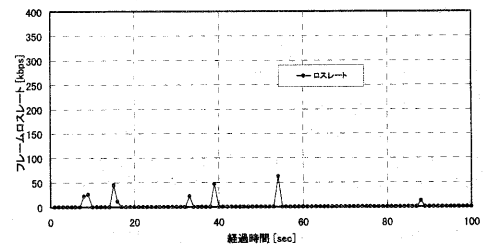


図9-3 1秒間あたりのパケットロス量

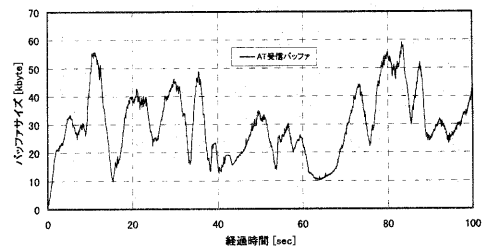


図9-4 AT受信バッファの時系列変動

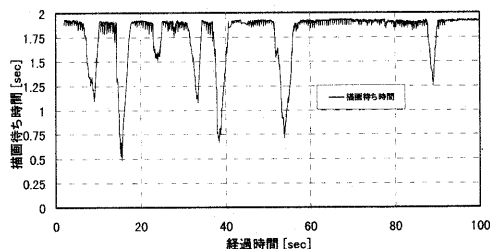


図9-5 描画待ち時間の時系列変動

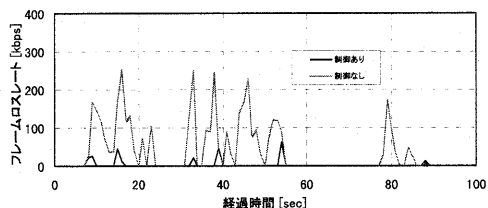


図 10 制御あり／なし時のフレームロス変動

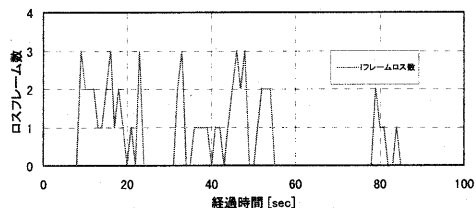


図 11 制御なし時の I フレームのロス数変動

謝 辞

日頃ご指導いただく浅見所長，松島副所長，および水池執行役員に深謝します。

文 献

- [1] <http://www.kddi.com/index.html>
- [2] <http://www.3gpp2.org/>
- [3] J. Postel, "User Datagram Protocol," RFC768, Aug. 1980.
- [4] J. Chung et al., "Better-Behaved, Better-Performing Multimedia Networking," SCS Euromedia Conference, May 2000.
- [5] T. Warabino et al., "Video Transcoding Proxy for 3G wireless Mobile Internet Access," IEEE Commun. Mag., vol.38, no.10, Oct. 2000.
- [6] S. McCanne et al., "Receiver-driven layered multicast," in Proc. of ACM SIGCOMM'96, March 1996.
- [7] <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>
- [8] A. Jalali et al., "Data Throughput of CDMA-HDR a High Efficiency - High Data Rate Personal Communication Wireless System," in Proc. of VTC-2000 Spring, May 2000.
- [9] <http://www-tkn.ee.tu-berlin.de/~fitzek/TRACE/ltvt.html>